

# 有限要素法を用いたホワイトトッピングの接着レベルの推定

西山 大三<sup>1</sup>・M. Asghar Bhatti<sup>2</sup>・Hosin D. Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員, Ph. D. 東京電機大学 建設環境工学科 (〒350-0384 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA, U. S. A.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA, U. S. A.

薄・超薄層ホワイトトッピング舗装における、コンクリートオーバーレイと既設舗装の間の接着レベルを定量化するために、三次元有限要素解析を行った。境界面での層間の接着をシミュレーションするために、バネ要素が用いられた。適切なバネ剛性値を用いることで、完全接着、部分接着、非接着を表現した。接着面に接している二つの層に生じるひずみ誤差を基に、接着レベルを定義することができる。また、東本等で行われた接着強度実験結果と、有限要素モデルでシミュレーションされた結果を比較検討した。最後に異なったオーバーレイ層厚、接着レベルを表現するために適切なバネ剛性を選択できる表を作成した。

*Key Words : ultra-thin whitetopping, 3-D FEM, spring elements, interface bonding level, spring stiffness*

## 1. はじめに

1960年代に建設されたアメリカ合衆国高速道路システムの主要な道路は、設計寿命がすでに越しているものが大半である。このシステムの再建には、アメリカ国内の公共政府機関に、重大な経済および技術問題を与えている。12~15cm コンクリートオーバーレイは、5~7.5cm アスファルトオーバーレイの150%以上の費用がかかる。しかしコンクリートオーバーレイはアスファルト舗装の二倍以上の寿命を持つと言われている。1993年までに、低交通量道路を中心とした超薄層ホワイトトッピングが、189箇所建設されている。1977年以降、アイオワ州では約650km以上の州道路に、コンクリートオーバーレイが施工されている。ほとんどの舗装セクションにおいて、車が停発進する交差点での舗装の損傷が激しい。1991年から1997年にかけて、北米28州で約200箇所の超薄層ホワイトトッピングセクションが建設されている。

従来のコンクリート舗装は、曲げによるエネルギーを吸収するように設計されており、曲げ応力に耐えられるだけに十分な層厚が必要である。従来のコンクリートオーバーレイは、超重量トラックによっ

て生じる、アスファルト舗装で発生しやすいわだち掘れを解消するために用いられている。これらのコンクリートオーバーレイは、一般的に最低12cm層厚であり、既設舗装とコンクリートオーバーレイとの間には、接着がないものと仮定されている<sup>1)</sup>。しかしながら、二層間を接着することにより、コンクリート断面の中立軸が、コンクリートの断面中心から底辺に移動する。この中立軸の移動が、コンクリートオーバーレイ底辺の応力を減少させる。コンクリートオーバーレイとその真下に存在する既設アスファルト舗装は、二つの独立した層としてではなく、一複合体として挙動する。この一複合体の挙動は、コンクリートオーバーレイに発生する応力を著しく低下させる。したがって、既設アスファルト舗装に接着されたコンクリートオーバーレイは、同じ荷重レベルであれば、非接着のコンクリートオーバーレイよりも層厚を薄くすることができる。薄層コンクリートオーバーレイと従来のコンクリートオーバーレイとの違いは4つある。それらは以下の通りである。1) 従来のコンクリートオーバーレイ層厚が10~18cmなのに対して、薄層コンクリートオーバーレイ層厚は5~10cmである。2) コンクリートオーバーレ

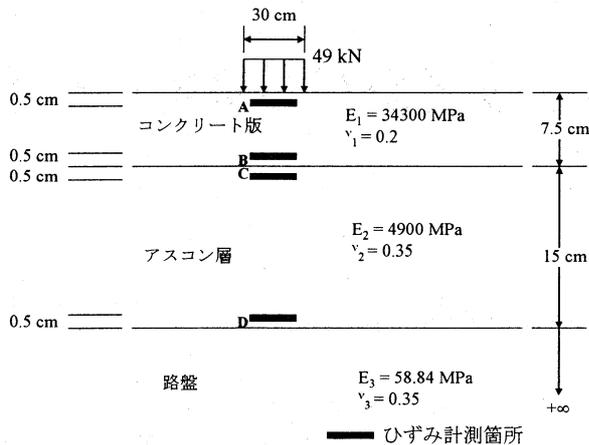


図-1 コンクリートオーバーレイ断面図

いと既設アスファルト舗装間の接着が必要。3) 従来のモデル (約 3.7~5.5m) よりも短い目地間隔 (約 0.6~1.8m) が必要。4) 既設アスファルトが十分な層厚を維持している<sup>2)</sup>。

薄層コンクリートオーバーレイの新規施工で完全接着を行っても、接着状態は時間とともに劣化していく。境界面での接着状態が良い舗装は、舗装を良好な状態を長く維持することが可能である。したがって、良好な接着状態を提供し、接着状態の劣化を推測することが大きな課題となっている。しかしながら、さまざまな劣化状態下における、境界面の接着応答を定量化する研究は、今日あまり普及していない。

本研究では、コンクリートオーバーレイと既設アスファルト舗装との間の境界面で生じる、さまざまな接着状態をモデル化するために、汎用ソフト ANSYS を用いて三次元有限要素モデルを構築した<sup>3)</sup>。このモデルを用いて、さまざまな接着状況 (完全接着、部分接着、非接着状態) のパラメータ解析を行った。

このモデルで、特定の層厚、荷重レベルにおける接着状態を擬似的に操作することが可能となる。接着レベルは要素間に適用されたバネ係数で表現されており、このバネ係数を変動させることで、非接着状態の舗装の挙動をシミュレーションすることが可能となる。

## 2. コンクリートオーバーレイが完全接着された有限要素モデル

### (1) 二層が完全接着された有限要素モデル

本研究では、コンクリートオーバーレイが完全に接着されている、三次元有限要素解析モデルを構築した。このモデルは三層構造であり、表層のコンクリートオーバーレイ、既設アスファルト舗装の中間

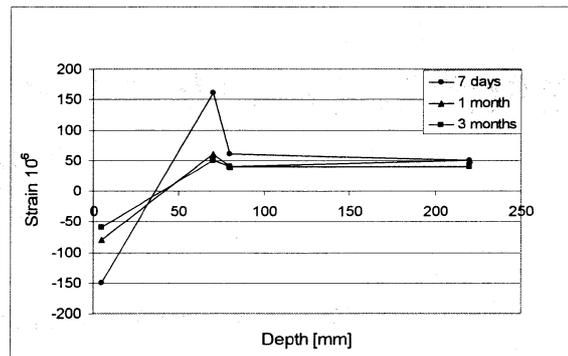


図-2 ひずみ分布 (東本 2000)

層、および弾性基礎の路盤がモデル化されている。このモデルは、接着面にバネ要素を含んでいない、接着面で二層間にスライドは生じないようにしている。すなわち、二層が完全に接着されているモデルである。図-1 にその舗装断面図を示す。コンクリートオーバーレイの厚さは 2.5~10cm で、アスファルト舗装厚は 15cm である。新規コンクリートの弾性係数は 34300 [MPa]、アスファルトは 4900 [MPa]。路盤の厚さとその弾性係数は、それぞれ 150 [cm]、58.84 [MPa]とした。有限要素モデルは 1/4 対称モデルとして、コンクリート版は 45x45 [cm]とした。49 [kN]荷重を舗装の中心部に載荷し、深さ位置 0.5cm、7cm、8cm、22cm のひずみを計算した。二層の接着状態は、深さ位置 7cm と 8cm でのひずみ値を用いる (二層の境界面は深さ位置 7.5cm)。縁部分の境界条件は、全方向固定とした。

### (2) 境界面のひずみ測定実験

二層が完全に接着された完全接着舗装モデルは、境界面での両層のひずみは理論的には同じ値になる。この現象は、コンクリートオーバーレイが完全に接着された有限要素モデルで確認された (深さ位置 7.5cm)。さらに東本等<sup>4)</sup>は、49 kN 荷重下での境界面でのひずみを計測した。

図-2 に実験結果の一部 (東本等の論文から抜粋<sup>4)</sup>) を示す。舗装中心部での両層のひずみ値 (深さ位置 7cm と 8cm) は、とても近い値となっており、接着状態が良好であることが確認できる。材齢 7 日のコンクリートは完全に付着していないために、コンクリート版とアスファルト層の境界面でのひずみに大きな差がある。90 日コンクリートの場合、養生が十分に行われているために、接着状態が良好となり、境界面付近での二層のひずみがほぼ一致している。これらのひずみは二層の境界面ではなく、境界面から上下 0.5cm 離れた箇所のひずみ値であるため、完全接着であってもひずみ値は完全には一致しない。

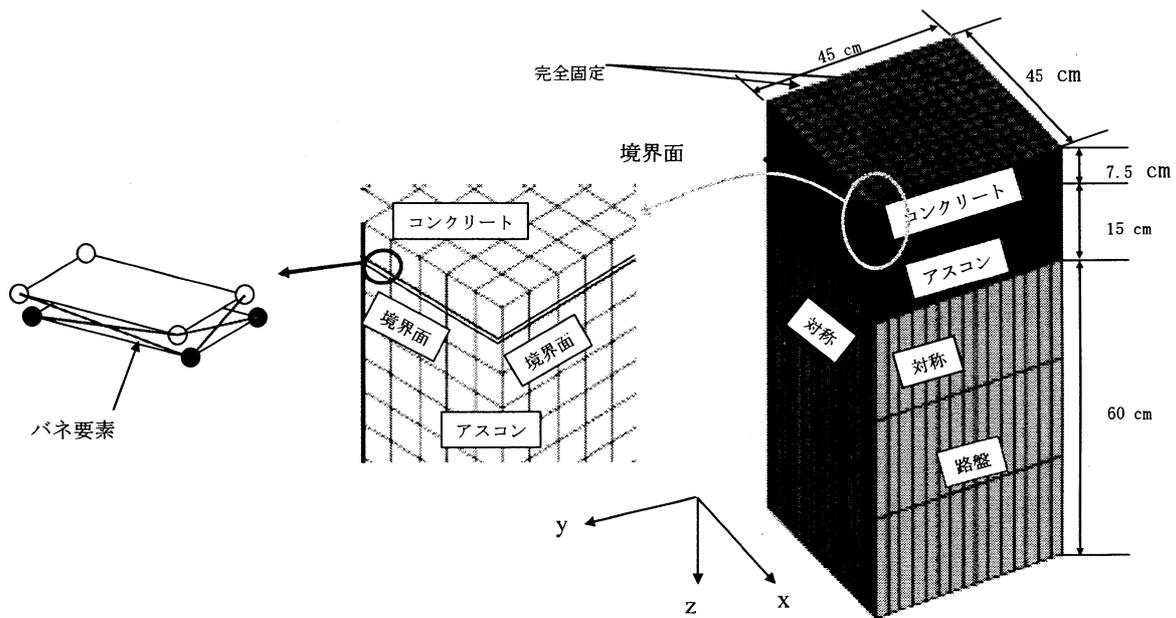


図-3 独立な二層を含む三次元有限要素モデル

### 3. 薄層コンクリートオーバーレイ有限要素モデル

#### (1) 有限要素モデル

境界面における様々な接着状態をモデル化するためには、コンクリート版とアスファルト層が独立であり、境界面に面する表面がそれぞれ独立である必要がある。境界面に接しているコンクリート版の下底面とアスファルトの上表面は、幾何学的には同一な位置に存在していても、それぞれ独立な表面になっている。

有限要素モデルにおいては、境界面の同一座標点に二つの接点が独立に存在することになる。これらの接点にバネ要素が付け加えられることにより、コンクリート版とアスファルト層が独立に挙動して、接着状態を数値実験することが可能となる。バネ要素の自由度は1であるため、水平方向のみに変形する。これは独立した層間の挙動を表すことに適している。バネ要素のバネ係数を変動させることにより、境界面の接着強度を変化させることができる。

本研究では、境界面に684個のバネ要素が含まれる有限要素モデルを構築した。図-3に構築された有限要素モデルを示す。このモデルは、コンクリート版とアスファルト層が一複合体として挙動する完全接着、二層が部分的に独立な挙動をする部分接着、および二層が独立に挙動する非接着状態を表現することができる。材料定数、モデルサイズ、メッシュサイズ、境界条件、荷重レベルは、先に述べたコンクリート版が完全接着された有限要素モデルと同じである。

#### (2) 接着レベルの定義

境界面上の舗装中心位置のひずみは、二層の接着状態を判断するのに必要な情報である。コンクリート版の下底面とアスファルトの上表面のひずみを用いて、接着状態を求めることができる。完全接着状態での二層のひずみは、二層が一複合体として挙動するため、同じ値であることが理想である。一方、非接着状態での二層のひずみは、二層が独立に挙動するため、異なった値になる。本研究では、境界面の二層のひずみ誤差を用いて、これらの接着状態を数値的にモデル化した。以下に接着レベルの定義式を述べる。

ほぼ完全な非接着状態を示すバネ係数  $K = 1.0$  [N/cm]の条件下で有限要素解析を行い、境界面上に発生するコンクリート版の下底面とアスファルト層の上表面のひずみの差異の絶対値を  $\Delta \varepsilon_{K=1}$  とする。

このひずみ差異は、接着レベルを求めるためのインデックスとなる。

$$\Delta \varepsilon_{K=1} = \left\| \varepsilon_{u,K=1} - \varepsilon_{l,K=1} \right\| \quad (1)$$

ここに、

$\varepsilon_{u,K=1}$  : バネ係数  $K = 1.0$  [N/cm]でのコンクリート版の下底面のひずみ

$\varepsilon_{l,K=1}$  : バネ係数  $K = 1.0$  [N/cm]でのアスファルト層の上表面のひずみ

次に、任意のバネ係数を設定して有限要素解析を行い、そのときの境界面上の二層のひずみを求める。それらのひずみ値と式(1)で求めた値を用いて、以下のように接着レベルを計算する。

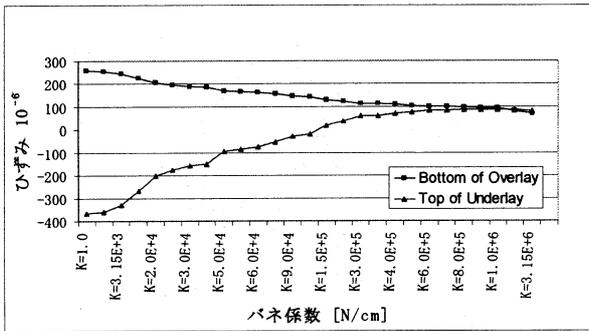


図-4 各バネ係数に対するひずみ値 (7.5cm コンクリート版層厚モデル)

$$\text{接着レベル [\%]} = \left( 1 - \frac{\|\varepsilon_u - \varepsilon_l\|}{\Delta\varepsilon_{K=1}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$\varepsilon_u$  は任意のバネ係数でのコンクリート版の下底面 (境界面上面) のひずみ,  $\varepsilon_l$  は任意のバネ係数でのアスファルト層の上表面 (境界面下面) のひずみである。

式(2)より, 非接着状態での接着レベルは0%に近い値となり, 完全接着状態では100%近くの値となる。部分接着状態は, 0~100%の間の値となる。

#### 4. 有限要素解析結果

様々なバネ係数[N/cm]に対する, コンクリート版の下底面, およびアスファルト層の上表面部のひずみ分布を図-4に示す。

境界面上の二層の各ひずみ分布は, 図-4の四角印(コンクリート版底面)と三角印(アスファルト層上面)で示されている。コンクリート版底面のひずみは正の値(引張)であり, バネ係数が増加するにつれて, ひずみ値が減少する。同様に, アスファルト層上面のひずみは負の値(圧縮)であり, バネ係数の増加とともにひずみ値も増加する。バネ係数が小さい場合の両者のひずみ差は大きく, 境界面は非接着状態である。またバネ係数が増加するにつれて, ひずみ差が小さくなり, ある一定以上のバネ係数ではひずみ差がほぼゼロとなっている。この状態の境界面は, 完全接着状態であると解釈できる。

図-5は深さ方向におけるひずみ差のプロットであり, バネ係数が増加するにつれて, コンクリート版下面とアスファルト層上面(深さ7cmと8cm)のひずみ差が少なくなっている。

図-6に, コンクリートオーバーレイ層厚7.5cmの有限要素モデルと式(2)を用いて計算された, 接着レベルとバネ係数に対する関係図を示す。横軸のバネ係数は, 非接着( $K=1$ )から完全接着( $K=10^6$ )とした。このグラフから, 適切な接着レベルを与えるバネ係数を読み取ることができる。また与えられた舗装モデル

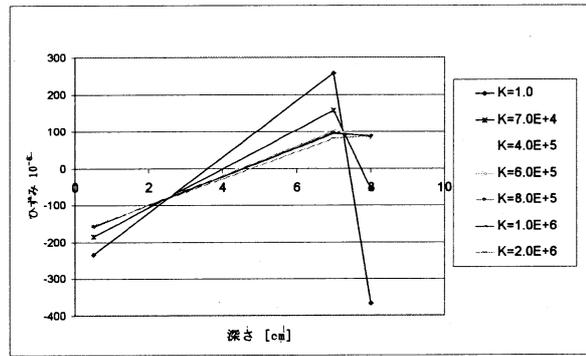


図-5 バネ係数の変化に伴うコンクリート版底面とアスファルト層上面のひずみ差

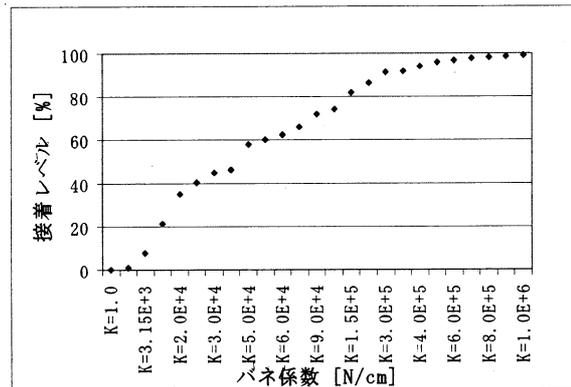


図-6 各バネ係数に対する接着レベル (7.5cm コンクリート版層厚モデル)

ルの境界面のひずみがわかれば, それに相当する接着レベルが式(2)より求まる。図-6において, バネ係数が増加するにつれて, 接着レベルも増加することがわかる。ある一定以上のバネ係数になると, 接着レベルがほぼ100%になり, 完全接着に近い状態になる。

図-4と図-6がスムーズなプロットでなく階段状になっているのは, 適切なバネ係数をランダムに選択して, それに対応するひずみをプロットしたためである。つまり選択されたバネ係数は不規則であるため, X軸(バネ係数)の増加量も不規則である。故にひずみ値も規則性を見せない。これを回避するには, より多くのバネ係数を選択することで, よりスムーズなプロットとすることができる。

前述の図-6から, バネ係数に対する接着レベルを読み取ることができるが, 典型的な接着レベル(20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%)を求める方がより実質的である。しかしながら, 接着レベルは境界面での二層のひずみ差から求まるために, 求めたい接着レベルを厳密な値に特定することはできない。従ってこの場合は, 内挿法を用いることで, 求めたい接着レベルを得ることができる。すなわち入力項目であるオーバーレイ層厚と荷重に対して, 求めたい接着レベルに相当する適切なバネ係数を推測して, 有限要素解析で境界面の二層のひずみ差を求める。

表-1 様々な接着レベルとコンクリート版層厚に対する必要バネ係数 (アスコン弾性係数 4900MPa, 載荷荷重 49kN) 単位:[N/cm]

	2.5cm	5cm	7.5cm	10cm
20%	8.11E+03	8.62E+03	9.38E+03	1.05E+04
30%	1.38E+04	1.47E+04	1.60E+04	1.79E+04
40%	2.11E+04	2.28E+04	2.48E+04	2.79E+04
50%	3.09E+04	3.36E+04	3.69E+04	4.12E+04
60%	4.42E+04	4.95E+04	5.37E+04	6.12E+04
70%	6.60E+04	7.45E+04	8.31E+04	9.33E+04
80%	1.03E+05	1.20E+05	1.38E+05	1.54E+05
90%	2.07E+05	2.25E+05	2.66E+05	3.10E+05

このひずみ差を式(2)に適応させて接着レベルを求める。次に、別の異なったバネ係数を推測して同様のことを行い、接着レベルを求める。これらの接着レベルを用いて、内挿法を行い典型的な接着レベルを求めた。表-1にその結果を示す。この表を用いて、コンクリート版層厚が 2.5, 5, 7.5, 10 cm のモデルにおいて、接着レベルが 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%となるばね係数を求めることが出来る。但しこの表の結果は、アスコン弾性係数 490kN/cm<sup>2</sup>, 載荷荷重 49kN の条件下に限定される。

最後に、本研究で構築された有限要素モデルおよび接着レベルの定義式に、東本等<sup>4)</sup>で行われたひずみ測定実験結果を当てはめてみた。舗装中心部、路肩付近、目地付近のひずみ実測値を、式(2)に適応した。低接着レベルでのひずみ差  $\Delta \varepsilon_{K=1}$  は、有限要素解析で求めたものを適応させた。式(2)より求めた接着レベルは、舗装中心部で 98%, 路肩付近で 71%, 目地付近で 71%となった。舗装中心部では完全接着に近いが、路肩付近や目地付近を完全接着に施工することは、境界条件などの理由によりやや難度があると考えられるためである。

## 5. 結論

既設アスファルト舗装上に薄層コンクリートオーバーレイを施工する場合、既設アスファルト層とコンクリート版との間の接着状態の良し悪しは、舗装寿命に大きく影響するため、非常に大切である。コンクリート版とアスファルト層の境界面で発生する二層のひずみ差を用いて、コンクリートオーバーレイの接着レベルを定量化することに成功した。接着状態が良好の場合は、コンクリート版とアスファルト層の境界面上のひずみがほぼ一致する。本研究で

は、境界面にバネ要素を含んだ三次元有限要素モデルを構築して、境界面のひずみ差を用いて様々な接着レベルを解析した。バネ係数が増加すると境界面上のひずみ差が減少する。このひずみ差が小さいほど、接着状態が良好であることがわかった。

三次元有限要素モデルを用いて、様々な接着レベルとコンクリートオーバーレイ層厚に相当する、バネ係数を計算して表にまとめた。この表を用いて、既知のコンクリートオーバーレイ層厚と要求する接着レベルに相当する、最も適切なバネ係数を知ることができる。また、この表にひずみ実測データを適応させて、舗装中心部、路肩、目地付近の接着レベルを求めて、本モデルが実測データにも適用できることを示した。

## 6. おわりに

本研究の有限要素モデルは、バネ係数で接着状態を表現しているため、実舗装での接着面の具体的な強度との関連性がないものとなっている。従って、二層タイプの舗装実験モデルを構築して、接着面での応力状態を測定し、それらの実験値と有限要素モデルのバネ係数を比較検討して関連づけることが、今後の課題と言える。

7. 謝辞：本研究において、大林道路(株)の東本氏等の実験の成果の一部を適用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Huddleston, J. et al: Effects of Early Traffic Loading on a Bonded Concrete Overlay, *Center for Transportation Research*, University of Texas, Austin, TX96-2911-3, September 1995.
- 2) Hurd, M. K.: Ultra-Thin Whitetopping, *Aberdeen's Concrete Construction* v42, n2, Feb., pp. 184-191, 1997.
- 3) Ansys: Ansys Basic Procedures Guide, Ansys Inc., 2002.
- 4) 東本崇, 小関裕二, 濱田秀則, 福手勤, 西澤辰男: ホワイトトッピングの載荷挙動およびその解析法, 土木学会舗装工学論文集, 第5巻, pp. 139-147, 2000.

## FEM ESTIMATION OF BOND LEVEL IN PAVEMENTS WITH THIN AND ULTRA THIN WHITETOPPING

## Taizo Nishiyama, M. Asghar Bhatti and Hosin D. Lee

Three dimensional finite element analysis (FEA) of pavements with thin and ultra thin whitetopping (UTW) is carried out to quantify the bond level between the concrete overlay and the existing pavement. Spring elements are employed at the interface to simulate the bond between the layers. Using appropriate spring stiffness values it is possible to simulate fully bonded, semi-bonded, and un-bonded conditions. A definition of bond level is introduced that is based on the strain gap between the two layers at the interface. Finite element simulations are carried out on the pavement that was tested by the Obayashi Road Research Company. The simulation results are compared with the experimental values and showed the bonded level at test section.